



(19) BUNDESREPUBLIK

DEUTSCHLAND

DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT(12) **Offenlegungsschrift**  
(10) **DE 198 46 447 A 1**

(51) Int. Cl. 7:

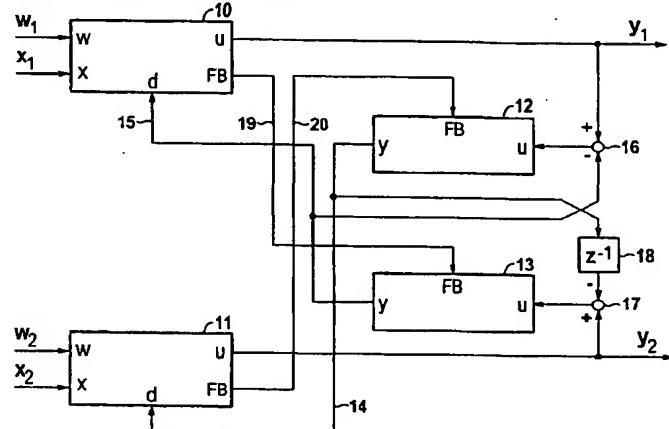
**G 05 B 13/02**

G 05 B 11/36

G 05 B 7/02

(21) Aktenzeichen: 198 46 447.9  
(22) Anmeldetag: 8. 10. 1998  
(43) Offenlegungstag: 13. 4. 2000(71) Anmelder:  
Siemens AG, 80333 München, DE(72) Erfinder:  
Bergold, Stefan, Dipl.-Ing., 67269 Grünstadt, DE;  
Pandit, Madhukar, Prof. Dr.-Ing.habil., 67663  
Kaiserslautern, DE; Pfeiffer, Bernd-Markus, Dr.-Ing.,  
76199 Karlsruhe, DE(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
zu ziehende Druckschriften:DE 197 29 632 C1  
DE 39 13 053 C2  
DE 32 40 809 C2  
DE 41 20 796 A1  
DE 41 00 064 A1  
DD 2 68 789 A1  
US 55 41 833 A  
EP 07 07 718 B1BERGOLD, Stefan, EBERSBERGER, Hubert: Eine  
kompakte Darstellung der Struktur  
modellprädiktiver Regelungsverfahren  
für Mehrgrößensysteme. In: at -  
Automatisierungstechnik 46, 1998, 10,  
S.468-477;  
FÖLLINGER, Otto: Regelungstechnik, Hüthig  
Buch Verlag, Heidelberg, 6.Aufl., 1990,  
S.365-386;**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**

(54) Regeleinrichtung zur Regelung einer Strecke mit mehreren verkoppelten Regelgrößen

(57) Die Erfindung betrifft eine Regeleinrichtung zur Regelung einer Strecke mit mehreren verkoppelten Regelgrößen mit jeweils einer Regelgröße ( $x_1, x_2$ ) zugeordneten Reglern (10, 11). Der Strecke ist ein Entkopplungsnetzwerk mit zumindest einem ersten Entkopplungsglied (12) vorgeschaltet, das eine erste Korrekturgröße (14) bildet. Ein Regler (11) ist derart ausgebildet, daß ein Integrator-Windup vermieden wird, wenn die mit der Korrekturgröße (14) korrigierte Ausgangsgröße ( $y_2$ ) eine Stellgrößenbegrenzung erreicht. Auch eine stroßfreie Hand-/Automatikumschaltung des Reglers wird ermöglicht. Die Erfindung wird angewandt bei der Regelung von Mehrgrößensystemen.

DE 198 46 447 A 1

DE 198 46 447 A 1

## Beschreibung

Die Erfindung betrifft eine Regeleinrichtung zur Regelung einer Strecke mit mehreren verkoppelten Regelgrößen nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1.

Aus dem Aufsatz "Grundlegende Untersuchungen über die Entkopplung von Mehrfachregelkreisen" von W. Engel, veröffentlicht in "Regelungstechnik", 1966, Heft 12, Seiten 562 bis 568, ist bereits eine Regeleinrichtung für eine Regelstrecke, an der mehrere Größen geregelt werden, die sich gegenseitig beeinflussen, bekannt. Als Möglichkeiten zur Beschreibung einer Strecke mit mehreren verkoppelten Regelgrößen, eines sogenannten Mehrgrößensystems, werden die P-kanonische und die V-kanonische Struktur angegeben. Wenn über die Zusammenhänge und über den Signalverlauf innerhalb einer Mehrfachregelstrecke nichts bekannt ist, wird vorgeschlagen, der Einfachheit halber die P-kanonische Struktur zur Beschreibung zu wählen. In einer P-kanonischen Struktur eines Übertragungssystems hängt jede Ausgangsgröße von den Eingangsgrößen, nicht aber von anderen Ausgangsgrößen ab. Fig. 1 zeigt ein Blockschaltbild eines  $2 \times 2$ -Mehrgrößensystems in P-kanonischer Struktur. Die Eingangsgrößen werden als  $y_1$  und  $y_2$ , die Ausgangsgrößen als  $x_1$  und  $x_2$  bezeichnet. Bei einer Regelstrecke stellen die Eingangsgrößen  $y_2$  und  $y_2$  an Stellglieder gegebene Stellgrößen, die Ausgangsgrößen  $x_1$  und  $x_2$  mit meßtechnischen Hilfsmitteln erfaßte Regelgrößen der Strecke dar. Die gezeigte Struktur kann ohne weiteres für eine andere Zahl von Ein- und Ausgängen erweitert werden, wie es in dem obengenannten Aufsatz von Engel für ein  $n \times n$ -System angegeben ist. Die beiden Übertragungsfunktionen  $g_{11}$  und  $g_{22}$  zwischen der Eingangsgröße  $y_1$  und der Ausgangsgröße  $x_1$  bzw. zwischen der Eingangsgröße  $y_2$  und der Ausgangsgröße  $x_2$  werden Hauptstrecken, die Übertragungsfunktionen  $g_{12}$  und  $g_{21}$  zwischen  $y_2$  und  $x_1$  bzw. zwischen  $y_1$  und  $x_2$  werden Koppelstrecken genannt.

Die P-kanonische Struktur hat den Vorteil, daß sie für den Anwender anschaulich ist und daß zur Identifikation der Übertragungsfunktionen in den Haupt- und Koppelstrecken auf übliche Verfahren zurückgegriffen werden kann. Ein dazu geeignetes Identifikationsverfahren ist beispielsweise in der DE 41 20 796 A1 beschrieben. Die Identifikation der Übertragungsfunktionen  $g_{11}$  und  $g_{21}$  kann nach dem bekannten Verfahren durchgeführt werden, indem die Eingangsgröße  $y_2$  konstant gehalten und mit der Eingangsgröße  $y_1$  eine Anregungsfunktion an die Übertragungsglieder, d. h. an die zu regelnde Strecke, gelegt wird. Aus den Reaktionen der Ausgangsgrößen  $x_1$  und  $x_2$  kann eine geeignete Übertragungsfunktion  $g_{11}$  bzw.  $g_{21}$  berechnet werden. In analoger Weise sind auch die Übertragungsfunktionen  $g_{12}$  und  $g_{22}$  bei konstant gehaltener Eingangsgröße  $y_1$  zu ermitteln.

In dem eingangs genannten Aufsatz von Engel ist weiterhin angegeben, daß ein derartiges Mehrgrößensystem mit einer Einrichtung geregelt werden kann, wie sie in Fig. 2 dargestellt ist. Der prinzipielle Aufbau wird wiederum anhand eines  $2 \times 2$ -Mehrgrößensystems beschrieben, das mit den bereits in Fig. 1 eingeführten Bezeichnungen versehen ist. Dem Mehrgrößensystem 1 ist ein Entkopplungsnetzwerk 2 in P-kanonischer Struktur vorgeschaltet. Durch Entkopplungsglieder 3 und 4 werden Übertragungsfunktionen  $k_{21}$  bzw.  $k_{12}$  realisiert, die beispielsweise nach den im Aufsatz von Engel beschriebenen Verfahren ermittelt werden können. Die Entkopplungsglieder  $k_{21}$  und  $k_{12}$  haben die Aufgabe, die Verkopplung innerhalb des Mehrgrößensystems 1, welches im gezeigten Regelkreis die Strecke darstellt, zu reduzieren, so daß die vorkompensierte Strecke 5, die aus der Strecke 1 und dem vorgeschalteten Entkopplungsnetzwerk 2 gebildet wird, annähernd entkoppelt ist. Annähernd entkop-

pelt bedeutet hierbei, daß die Wirkungspfade von einem Ausgangssignal  $u_1$  eines Reglers 6 mit einer Übertragungsfunktion  $r_{11}$  auf die Regelgröße  $x_2$  und von einem Ausgangssignal  $u_2$  eines Reglers 7 mit einer Übertragungsfunktion  $r_{22}$  auf die Regelgröße  $x_1$  für den Entwurf der Reglerübertragungsfunktionen  $r_{11}$  und  $r_{22}$  bedeutungslos sind. Im Idealfall existiert keine Wirkverbindung mehr zwischen der Ausgangsgröße  $u_1$  und der Regelgröße  $x_2$  bzw. zwischen der Ausgangsgröße  $u_2$  und der Regelgröße  $x_1$ . Die vorkompensierte Strecke 5 zerfällt damit in zwei Eingrößenstrecken mit der Eingangsgröße  $u_1$  und der Ausgangsgröße  $x_1$  bzw. mit der Eingangsgröße  $u_2$  und der Ausgangsgröße  $x_2$ , für die jeweils ein Eingrößenregler 6 bzw. 7 entworfen werden kann. Ein geeignetes Entwurfsverfahren für PI- oder PID-Regler in Eingrößensystemen ist beispielsweise das Betragsoptimum, das aus der EP 0 707 718 B1 bekannt ist.

Die in Fig. 2 gezeigte Regeleinrichtung kann ohne weiteres auf einem Prozeßleitsystem implementiert werden. Verschiedene Reglertypen und Summationspunkte sind als Funktionsbausteine üblicherweise vorhanden; lediglich die Entkopplungsglieder müssen neu implementiert werden.

Die beschriebene Regeleinrichtung zeigt im linearen Betrieb gutes Regelverhalten. Es ist jedoch keine Strategie bekannt, mit welcher in der Praxis auftretende nichtlineare Fälle, beispielsweise wenn die Stellgröße  $y_1$  in ihre Begrenzung läuft oder wenn die Regler 6 oder 7 zwischen Hand- und Automatikbetrieb umgeschaltet werden, vorteilhaft behandelt werden können.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine Regeleinrichtung zur Regelung einer Strecke mit mehreren verkoppelten Regelgrößen zu schaffen, die sich durch ein verbessertes Regelverhalten auszeichnet.

Zur Lösung dieser Aufgabe weist die neue Regeleinrichtung der eingangs genannten Art die in Anspruch 1 angegebenen Merkmale auf. Vorteilhafte Weiterbildungen sind in den Unteransprüchen beschrieben.

Die Erfindung hat den Vorteil, daß die Regelgröße, selbst wenn die zugehörige Stellgröße sich zuvor in der Stellgrößenbegrenzung befunden hat, schnell auf eine Vorzeichenumkehr der jeweiligen Regeldifferenz am Eingang des Reglers reagiert. Ursache dafür ist, daß die Stellgrößenänderung sofort nach Vorzeichenumkehr der Regeldifferenz eine Umkehrung ihres Vorzeichens vollführt, da der sogenannte Integrator-Windup, d. h. ein Hochlaufen des Integrators eines PI- oder PID-Reglers während sich die Stellgröße in ihrer Begrenzung befindet, vermieden wird. Wenn in einer Mehrgrößenregelung nur ein Entkopplungsglied verwendet wird, genügt es bereits, eine Stellgrößenbegrenzung lediglich anhand der mit der Korrekturgröße des Entkopplungsglieds korrigierten Ausgangsgröße des jeweiligen Reglers zu erkennen und mit einer geeigneten Strategie einen Integrator-Windup zu vermeiden.

Zur Vermeidung eines Integrator-Windup können verschiedene Strategien eingesetzt werden. Eine Möglichkeit besteht darin, den Zustand, d. h. den Wert des Integralanteils, und den Ausgang des Reglers bei Erreichen der Stellgrößenbegrenzung konstantzuhalten. Eine weitere Möglichkeit ist, solange die korrigierte Ausgangsgröße bei Anlegen der Regeldifferenz an den Reglerkern die Stellgrößenbegrenzung erreichen oder übersteigen würde, zur Vermeidung des Integrator-Windup eine derart ermittelte Größe anstelle der Regeldifferenz an den Reglerkern zu schalten, daß die korrigierte Ausgangsgröße des Reglers dem Wert der Stellgrößenbegrenzung entspricht. Diese Möglichkeit ist in der EP 0 707 718 B1 ausführlich beschrieben, auf welche bezüglich weiterer Details verwiesen wird.

In vorteilhafter Weise kann ein Standardregler verwendet werden, in den bereits eine Einrichtung zur Vermeidung ei-

nes Integrator-Windup bei Stellgrößenbegrenzung sowie eine Einrichtung zur Störgrößenaufschaltung integriert ist, auf welche die erste Korrekturgröße geführt werden kann. In diesem Fall erzeugt das Entkopplungsnetzwerk die erste Korrekturgröße in anschaulicher Weise nach einer Übertragungsfunktion, die für ein Entkopplungsnetzwerk in P-kanonischer Form ermittelt ist.

Wenn in einer Strecke wechselseitige Verkopplungen der Regelgrößen bestehen, kann durch ein Entkopplungsnetzwerk mit Entkopplungsgliedern für beide Verkopplungen und durch Korrektur der Reglerausgangsgröße mittels der Störgrößenaufschaltung in vorteilhafter Weise ein besseres Regelverhalten der Mehrgrößenregelung erreicht werden. Eine vorteilhaft einfache Möglichkeit zur Vermeidung des Integrator-Windup bei Erreichen der Stellgrößenbegrenzung ist das Konstanthalten des Zustands und der Ausgangsgröße des jeweiligen Reglers. Dadurch wird erreicht, daß bei einer Vorzeichenumkehr der Regeldifferenz am Eingang des Reglers auch die Stellgrößenänderung sofort eine Umkehrung ihres Vorzeichens vollführt. Damit diese Maßnahme nicht durch eine inzwischen großgewordene Störgröße auf der Störgrößenaufschaltung wirkungslos wird, können die Entkopplungsglieder, deren Korrekturgrößen auf die Störgrößenaufschaltung geführt sind, in vorteilhafter Weise derart ausgebildet werden, daß auch sie bei Erreichen der Stellgrößenbegrenzung ihre Zustände und ihre Korrekturgrößen konstanthalten.

Anhand der Zeichnungen, in denen Ausführungsbeispiele der Erfindung dargestellt sind, werden im folgenden die Erfindung sowie Ausgestaltungen und Vorteile näher erläutert.

Es zeigen:

**Fig. 3** ein Blockschaltbild einer Regeleinrichtung für ein  $2 \times 2$ -Mehrgrößensystem,

**Fig. 4** ein Strukturbild eines Standard-PI-Reglers und

**Fig. 5** ein Blockschaltbild einer Regeleinrichtung für ein  $3 \times 3$ -Mehrgrößensystem.

In **Fig. 3** ist eine Regeleinrichtung für ein  $2 \times 2$ -Mehrgrößensystem, d. h. eine Strecke mit zwei Stellgrößen  $y_1$  und  $y_2$  sowie zwei Regelgrößen  $x_1$  und  $x_2$ , dargestellt. Die Strecke wurde der Übersichtlichkeit wegen weggelassen. Zur Erzeugung der Stellgrößen  $y_1$  und  $y_2$  ist jeweils ein PI-Regler 10 bzw. 11 vorgesehen, der intern aus einer Führungsgröße  $w_1$  bzw.  $w_2$  und der Regelgröße  $x_1$  bzw.  $x_2$  jeweils eine Regeldifferenz bildet und die Stellgröße  $y_1$  bzw.  $y_2$  berechnet. Entkopplungsglieder 12 und 13 sind in bekannter Weise für eine Entkopplung des  $2 \times 2$ -Mehrgrößensystems durch ein Entkopplungsnetzwerk in P-kanonischer Form ermittelt und realisieren daher Übertragungsfunktionen  $k_{21}$  bzw.  $k_{12}$ , die den Übertragungsfunktionen der Entkopplungsglieder 3 bzw. 4 in **Fig. 2** entsprechen. An den y-Ausgängen der Entkopplungsglieder 12 und 13 gelieferte Korrekturgrößen 14 bzw. 15 sind auf d-Eingänge der Regler 11 bzw. 10 geführt, die für eine Einrichtung zur Störgrößenaufschaltung vorgesehen sind. Durch die Einrichtung zur Störgrößenaufschaltung wird jeweils eine Korrektur der Reglerausgangsgrößen vorgenommen. Die korrigierte Ausgangsgröße wird an u-Ausgängen der Regler 10 bzw. 11 ausgegeben und bildet die Stellgröße  $y_1$  bzw.  $y_2$  für das  $2 \times 2$ -Mehrgrößensystem. Auf die u-Eingänge der Entkopplungsglieder 12 und 13 sind die korrigierten Ausgangsgrößen  $y_1$  bzw.  $y_2$  nach Abzug der zweiten Korrekturgröße 15 bzw. der ersten Korrekturgröße 14 durch ein Subtrahierglied 16 bzw. 17 geschaltet. Aus der beschriebenen Verschaltung der Regler 10 und 11 sowie der Entkopplungsglieder 12 und 13 resultiert wiederum ein Entkopplungsnetzwerk in P-kanonischer Form. Die gezeigte Verschaltung hat jedoch den Vorteil, daß die in Standardreglern für Eingrößensysteme bewährten Strategien zur Vermeidung eines Integrator-Windup sowie zur stoßfreien

Hand-/Automatikumschaltung nun auch für Mehrgrößensysteme anwendbar sind. Ein Verzögerungsglied 18 mit der Übertragungsfunktion  $z^{-1}$ , durch welches Werte in einer Abtastregelung um einen Abtastschritt verzögert werden, ist

- 5 dem Subtrahierglied 17 im Pfad der ersten Korrekturgröße 14 vorgeschaltet, um die durch die Verschaltung des Entkopplungsnetzwerks entstandene algebraische Schleife aufzutrennen. Ohne dieses Verzögerungsglied 18 würde sich im Blockschaltbild nach **Fig. 3** ein kreisförmiger Signalfluß ergeben und die Berechnungen in einer Abtastregelung könnten nicht in einem Zug durchgeführt werden. Es müßte in jedem Abtastschritt mit großem Rechenaufwand eine iterative Berechnung vorgenommen werden. Dieser Aufwand wird durch das zusätzliche Verzögerungsglied 18 in vorteilhafter
- 10 Weise vermieden. Der erste Regler 10 und der zweite Regler 11 liefern an ihrem FB-Ausgang jeweils Steuersignale 19 bzw. 20, die anzeigen, ob die jeweilige korrigierte Ausgangsgröße eine Stellgrößenbegrenzung erreicht hat. Die Steuersignale 19 und 20 sind auf das zweite Entkopplungsglied 13 bzw. das erste Entkopplungsglied 12 geführt, die derart ausgebildet sind, daß sie bei gesetztem Steuersignal 19 oder 20 ihren Zustand und die zweite Korrekturgröße 15 bzw. die erste Korrekturgröße 14 konstanthalten. Diese Maßnahme ist besonders dann vorteilhaft, wenn auch der jeweilige Regler 10 oder 11 bei Erreichen der Stellgrößenbegrenzung seinen Zustand und Ausgang konstanthalte, da in diesem Fall bei einer Vorzeichenumkehr der Regeldifferenz die Änderung der jeweiligen Stellgröße sofort ihr Vorzeichen umkehrt. Dadurch wird ein weiter verbessertes Regelverhalten der Regeleinrichtung nach Erreichen einer Stellgrößenbegrenzung gewährleistet. Die Entkopplungsglieder 12 und 13 halten ihren Ausgang und ihren Zustand so lange konstant, bis die jeweilige Stellgröße die Begrenzung wieder verlassen hat und das entsprechende Steuersignal 20 bzw. 19 wieder zurückgesetzt wurde. Danach gehen die Entkopplungsglieder 12 und 13 wieder in Automatikbetrieb über. In Zustandsdarstellung lautet die Übertragungsfunktion eines linearen, dynamischen Entkopplungsglieds in der Betriebsart "Automatik", in welcher das jeweilige Steuersignal nicht gesetzt ist:

$$\underline{x}(k+1) = \underline{A} \cdot \underline{x}(k) + \underline{b} \cdot u(k)$$

$$y(k) = \underline{c}^T \cdot \underline{x}(k) + d \cdot u(k)$$

mit  $\underline{x}$  – Zustandsvektor,  
 $\underline{A}$  – Systemmatrix,  
 $\underline{b}$  – Eingangsvektor,  
 $\underline{c}^T$  – transponierter Ausgangsvektor und  
50  $d$  – Durchgangsfaktor.

In der Betriebsart "Halten" kann die Übertragungsfunktion der Entkopplungsglieder in Zustandsdarstellung durch die beiden Gleichungen beschrieben werden:

$$x(k+1) = x(k)$$

$$\bar{y}(k) = y(k-1)$$

- 55 In vorteilhafter Weise werden durch die stoßfreie Hand-/Automatikumschaltung Einschwingvorgänge, die sonst nach dem Einregeln eines Arbeitspunktes im Handbetrieb und Umschalten auf den Automatikbetrieb ablaufen würden, wesentlich verringert.

In **Fig. 4** ist ein Blockschaltbild eines Standardreglers mit einem PI- oder PID-Reglerkern 40 gezeigt, auf welchen eine aus einer Führungsgröße  $w$  und einer Regelgröße  $x$  gebildete Regeldifferenz geführt ist. Der Reglerkern 40 ist zur Vermeidung von Integrator-Windup und zur stoßfreien

Hand-/Automatikumschaltung zusätzlich zum eigentlichen Regelalgorithmus um einige Funktionen erweitert. Im Automatikbetrieb und wenn die Stellgrößenbegrenzung nicht erreicht wird, erzeugt der Reglerkern 40 eine Ausgangsgröße  $y_0$  in bekannter Weise nach dem jeweils verwendeten PI- oder PID-Algorithmus. Beispielsweise bei einem PID-Regler wird die Ausgangsgröße  $y_0$  durch additive Überlagerung eines P-Anteils  $y_P$ , eines I-Anteils  $y_I$  und eines D-Anteils  $y_D$  berechnet. Durch eine Einrichtung zur Störgrößenaufschaltung 41, die beispielsweise durch ein einfaches Summierglied realisiert werden kann, wird der Ausgangsgröße  $y_0$  eine Störgröße  $d$  überlagert. Die auf diese Weise korrigierte Ausgangsgröße  $y_0$  ist auf eine Einrichtung 42 zur Stellgrößenbegrenzung geschaltet, welche die korrigierte Ausgangsgröße auf den Stellbereich eines in Fig. 4 nicht dargestellten, dem Regler nachgeschalteten Stellglieds beschränkt. Durch die Einrichtung 42 wird das Steuersignal FB gebildet, welches anzeigt, ob die korrigierte Ausgangsgröße  $y_0$  die Stellgrößenbegrenzung erreicht hat. Die Begrenzung des Reglers wirkt somit auf die Summe der Ausgangsgröße  $y_0$  und der am d-Eingang des Reglers anliegenden Störgröße, welche in der in Fig. 3 gezeigten Verschaltung der Standardregler 10 und 11 eine durch ein Entkopplungsglied erzeugte Korrekturgröße ist. Durch ein Steuersignal 43 wird ein Handbetrieb des Reglers eingestellt, falls dieses gesetzt ist. Im Handbetrieb gibt der Regler den Wert eines Signals  $y_N$  an seinem u-Ausgang aus, sofern das Signal  $y_N$  nicht die Stellgrößenbegrenzung erreicht. Um eine stoßfreie Umschaltung von Hand- in Automatikbetrieb zu erreichen, wird der I-Anteil des Reglerkerns 40 unmittelbar nach Einstellen des Automatikbetriebs durch Rücksetzen des Signals 43 folgendermaßen initialisiert:

$$Y_I = Y_N - Y_P - Y_D - d.$$

Das Steuersignal FB ist auf den Reglerkern 40 geführt und leitet bei diesem eine Strategie zur Vermeidung eines Integrator-Windup ein, wenn die mit der Korrekturgröße am d-Eingang korrigierte Ausgangsgröße  $y_0$  des Reglerkerns 40 eine Stellgrößenbegrenzung erreicht. Eine Möglichkeit zur Vermeidung eines Integrator-Windup ist, eine derart ermittelte Größe anstelle der Regeldifferenz im PID-Algorithmus des Reglerkerns einzusetzen, daß die korrigierte Ausgangsgröße des Reglers gerade dem Wert der Stellgrößenbegrenzung entspricht. Bei dieser Strategie wird also auch der Wert am d-Eingang des Reglers berücksichtigt. Eine andere Möglichkeit zur Vermeidung des Integrator-Windup ist es, den Zustand und die Ausgangsgröße  $y_0$  des Reglerkerns 40 konstantzuhalten, solange die Stellgrößenbegrenzung erreicht wird und das Steuersignal FB gesetzt ist. Diese Strategie hat den Vorteil, daß unmittelbar nach einer Vorzeichenumkehr der Regeldifferenz auch die Änderung der Stellgröße ihr Vorzeichen unkehrt. Dieser Vorteil wird insbesondere dadurch verstärkt, daß auch Entkopplungsglieder, deren Korrekturgrößen auf den d-Eingang des Reglers geführt sind, ihren Zustand und ihre Korrekturgröße konstanthalten, solange das Steuersignal FB gesetzt ist.

Anhand Fig. 5 wird der Aufbau einer Regeleinrichtung für ein  $3 \times 3$ -Mehrgrößensystem beschrieben. Die Regeleinrichtung enthält drei Regler 50, 51 und 52, die jeweils in einfacher Weise als Standard-PI-Regler für Eingrößensysteme ausgebildet sein können. Die Regler 50, 51 und 52 erzeugen jeweils Stellgrößen  $y_1$ ,  $y_2$  bzw.  $y_3$ , die auf ein in Fig. 5 nicht dargestelltes  $3 \times 3$ -Mehrgrößensystem als Regelstrecke geführt sind. An dem  $3 \times 3$ -Mehrgrößensystem erfaßte Regelgrößen  $x_1$ ,  $x_2$  und  $x_3$  werden in den Reglern 50, 51 bzw. 52 mit Führungsgrößen  $w_1$ ,  $w_2$  bzw.  $w_3$  verglichen und daraus Regeldifferenzen berechnet. Entkopplungsglieder 53, 54,

- 55, 56, 57 und 58 dienen jeweils zur Entkopplung der Regelgrößen  $x_1$ ,  $x_2$  und  $x_3$  des  $3 \times 3$ -Mehrgrößensystems. Diese wurden für ein Entkopplungsnetzwerk mit P-kanonischer Struktur entworfen. Das Entkopplungsglied 53 realisiert eine Übertragungsfunktion  $k_{21}$ , das Entkopplungsglied 54 eine Übertragungsfunktion  $k_{31}$ , das Entkopplungsglied 55 eine Übertragungsfunktion  $k_{12}$ , das Entkopplungsglied 56 eine Übertragungsfunktion  $k_{32}$ , das Entkopplungsglied 57 eine Übertragungsfunktion  $k_{13}$  und das Entkopplungsglied 58 eine Übertragungsfunktion  $k_{23}$ . Die Indizes i und j in den Bezeichnungen der Übertragungsfunktionen  $k_{ij}$  geben an, daß die Regelgröße  $x_i$  mit gleichem Index i durch das jeweilige Entkopplungsglied von der Regelgröße  $x_j$  mit gleichem Index j entkoppelt wird. Durch ein Summierglied 59 werden die von dem Entkopplungsglied 55 gebildete Korrekturgröße und die Korrekturgröße des Entkopplungsglieds 57 aufsummiert und das Ergebnis auf den d-Eingang des Reglers 50 sowie auf ein Subtrahierglied 60 geschaltet, das diese Summe wiederum von der Stellgröße  $y_1$  subtrahiert und so Eingangsgrößen bildet, die auf die u-Eingänge der Entkopplungsglieder 53 und 54 geschaltet sind. In entsprechender Weise sind auch die d-Eingänge der Regler 51 und 52 sowie die u-Eingänge der Entkopplungsglieder 55, 56, 57 und 58 geschaltet. Verzögerungsglieder 61 und 62 dienen analog zum Verzögerungsglied 18 in Fig. 3 zur Auflösung einer algebraischen Schleife bei einer zeitdiskreten Realisierung der dargestellten Reglerstruktur. Für Mehrgrößensysteme mit mehr als drei Eing- und Ausgängen kann die in Fig. 5 dargestellte Struktur der Regeleinrichtung in entsprechender Weise erweitert werden.

Bei den in den Fig. 3 und 5 gezeigten Regeleinrichtungen können selbstverständlich Entkopplungsglieder weggelassen werden, wenn zwischen den jeweiligen Regelgrößen nur schwache oder keine Kopplungen bestehen. Entfällt beispielsweise in Fig. 3 das Entkopplungsglied 13, so kann auch auf das Summierglied 17, das Subtrahierglied 16 und die Beschaltung der Störgrößenaufschaltung des Reglers 10 verzichtet werden.

Bei Regeleinrichtungen für Mehrgrößensysteme, wie sie in den Fig. 2, 3 und 5 dargestellt sind, ist generell zu beachten, daß einzelne Regler nur in Handbetrieb genommen werden sollten, wenn die Strecke die Voraussetzung der verallgemeinerten Diagonaldominanz erfüllt. Bezüglich der Definition der verallgemeinerten Diagonaldominanz eines  $n \times n$ -Mehrgrößensystems wird auf "Regelungstechnik II: Mehrgrößensysteme, Digitale Regelung", J. Lunze, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1997, Seiten 307 bis 326, verwiesen.

Die beschriebene Regeleinrichtung ist als zeitdiskreter Regler in einem Automatisierungsgerät oder einer Recheneinheit eines Prozeßleitsystems sowie als analoger Regler mit Analogrechenbausteinen realisierbar. Im letzteren Fall können die Verzögerungsglieder 18, 61 und 62 entfallen.

#### Patentansprüche

1. Regeleinrichtung zur Regelung einer Strecke mit mehreren verkoppelten Regelgrößen, mit Reglern (10, 11), die jeweils einer Regelgröße ( $x_1$ ,  $x_2$ ) zugeordnet sind, mit einer der Strecke vorgeschalteten Entkopplungsnetzwerk mit zumindest einem ersten Entkopplungsglied (12), auf welches die Ausgangsgröße ( $y_1$ ) eines ersten Reglers (10) geführt ist und das eine erste Korrekturgröße (14) für die Ausgangsgröße ( $y_2$ ) eines zweiten Reglers (11) zur Verringerung der Kopplung zwischen den Regelgrößen ( $x_1$ ,  $x_2$ ) erzeugt, dadurch gekennzeichnet,

daß der zweite Regler (11) einen PI- oder PID-Reglerkern (40) aufweist und derart ausgebildet ist, daß ein Integrator-Windup vermieden wird, wenn die mit der ersten Korrekturgröße (14) korrigierte Ausgangsgröße (y<sub>2</sub>) des Reglerkerns (40) des zweiten Reglers (11) eine Stellgrößenbegrenzung erreicht.

5

2. Regeleinrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet,  
daß das erste Entkopplungsglied (12) die erste Korrekturgröße (14) nach einer Übertragungsfunktion (k<sub>21</sub>) erzeugt, die für ein Entkopplungsnetzwerk in P-kanonischer Form ermittelt ist, und  
daß der zweite Regler (11) eine Einrichtung (41) zur Störgrößenaufschaltung aufweist, auf welche die erste Korrekturgröße (14) geführt ist.

10

3. Regeleinrichtung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet,  
daß das Entkopplungsnetzwerk ein zweites Entkopplungsglied (13) aufweist, auf welches die korrigierte Ausgangsgröße (y<sub>2</sub>) des zweiten Reglers (11) nach Abzug der ersten Korrekturgröße (14) geführt ist und das eine zweite Korrekturgröße (15) für die Ausgangsgröße (y<sub>1</sub>) des ersten Reglers (10) nach einer Übertragungsfunktion (k<sub>12</sub>) erzeugt, die für ein Entkopplungsnetzwerk in P-kanonischer Form ermittelt ist,  
daß die Ausgangsgröße (y<sub>1</sub>) des ersten Reglers (10) nach Abzug der zweiten Korrekturgröße (15) auf das erste Entkopplungsglied (12) geführt ist,  
daß der erste Regler (10) einen PI- oder PID-Reglerkern (40) und eine Einrichtung (41) zur Störgrößenaufschaltung aufweist, auf welche die zweite Korrekturgröße (15) geführt ist, und  
daß der erste Regler (10) derart ausgebildet ist, daß ein Integrator-Windup vermieden wird, wenn die mit der zweiten Korrekturgröße (15) korrigierte Ausgangsgröße (y<sub>1</sub>) des ersten Reglers (10) eine Stellgrößenbegrenzung erreicht.

20

4. Regeleinrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß, solange die korrigierte Ausgangsgröße (y<sub>2</sub>) bei Anlegen der Regel-differenz an den Reglerkern (40) des zweiten Reglers (11) die Stellgrößenbegrenzung erreichen oder übersteigen würde, zur Vermeidung eines Integrator-Windup eine derart ermittelte Größe anstelle der Regel-differenz im Reglerkern eingesetzt wird, daß die korrigierte Ausgangsgröße (y<sub>2</sub>) des zweiten Reglers (11) dem Wert der Stellgrößenbegrenzung entspricht.

25

5. Regeleinrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß zur Vermeidung des Integrator-Windup bei Erreichen der Stellgrößenbegrenzung der Zustand und die Ausgangsgröße des zweiten Reglers (11) konstant gehalten werden.

30

6. Regeleinrichtung nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet,  
daß der zweite Regler (11) ein Steuersignal (FB) erzeugt, das bei Erreichen der Stellgrößenbegrenzung gesetzt wird, und  
daß das erste Entkopplungsglied (12) derart ausgebildet ist,

40

daß es bei gesetztem Steuersignal (FB) seinen Zustand und die erste Korrekturgröße (14) konstant hält.

45

7. Regeleinrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß zumindest der zweite Regler (11) zwischen Hand- und Automatikbetrieb umschaltbar ist, derart, daß die Umschaltung bezüglich der korrigierten Ausgangsgröße (y<sub>2</sub>) des

zweiten Reglers (11) stoßfrei erfolgt.

---

Hierzu 3 Seite(n) Zeichnungen

---

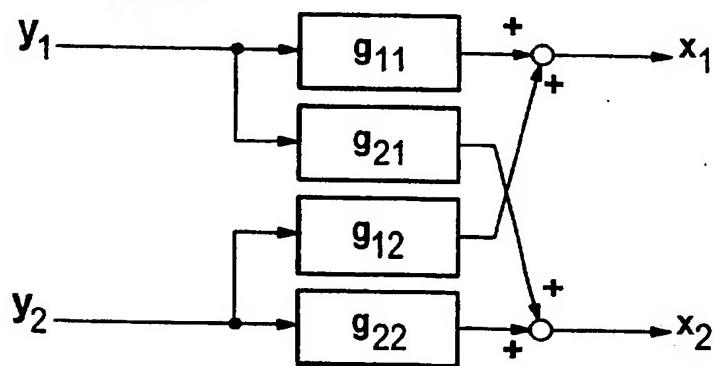


FIG 1

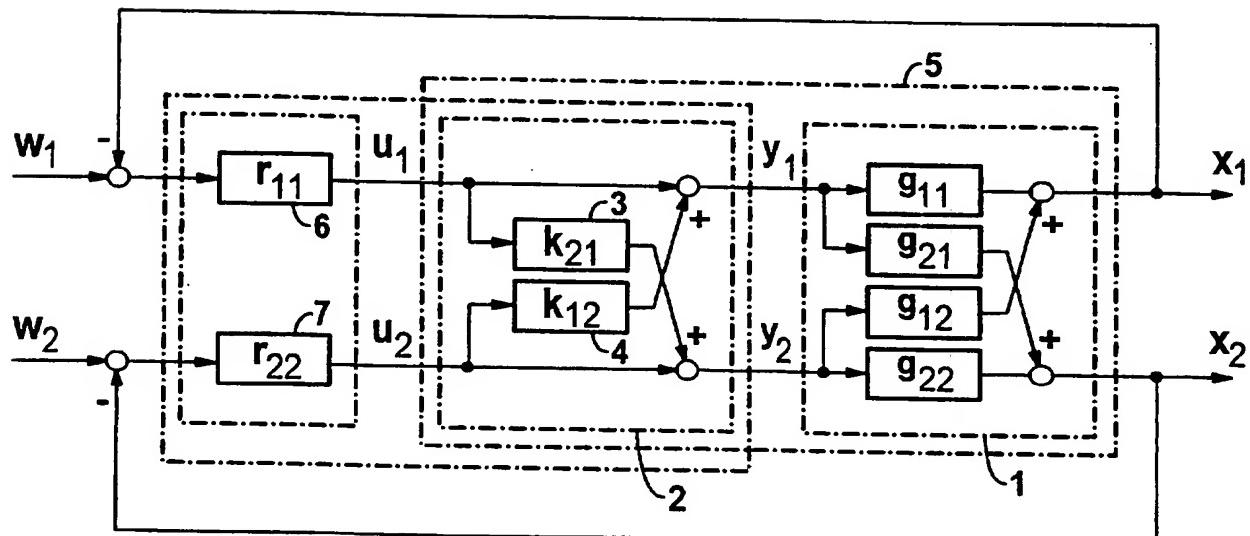


FIG 2

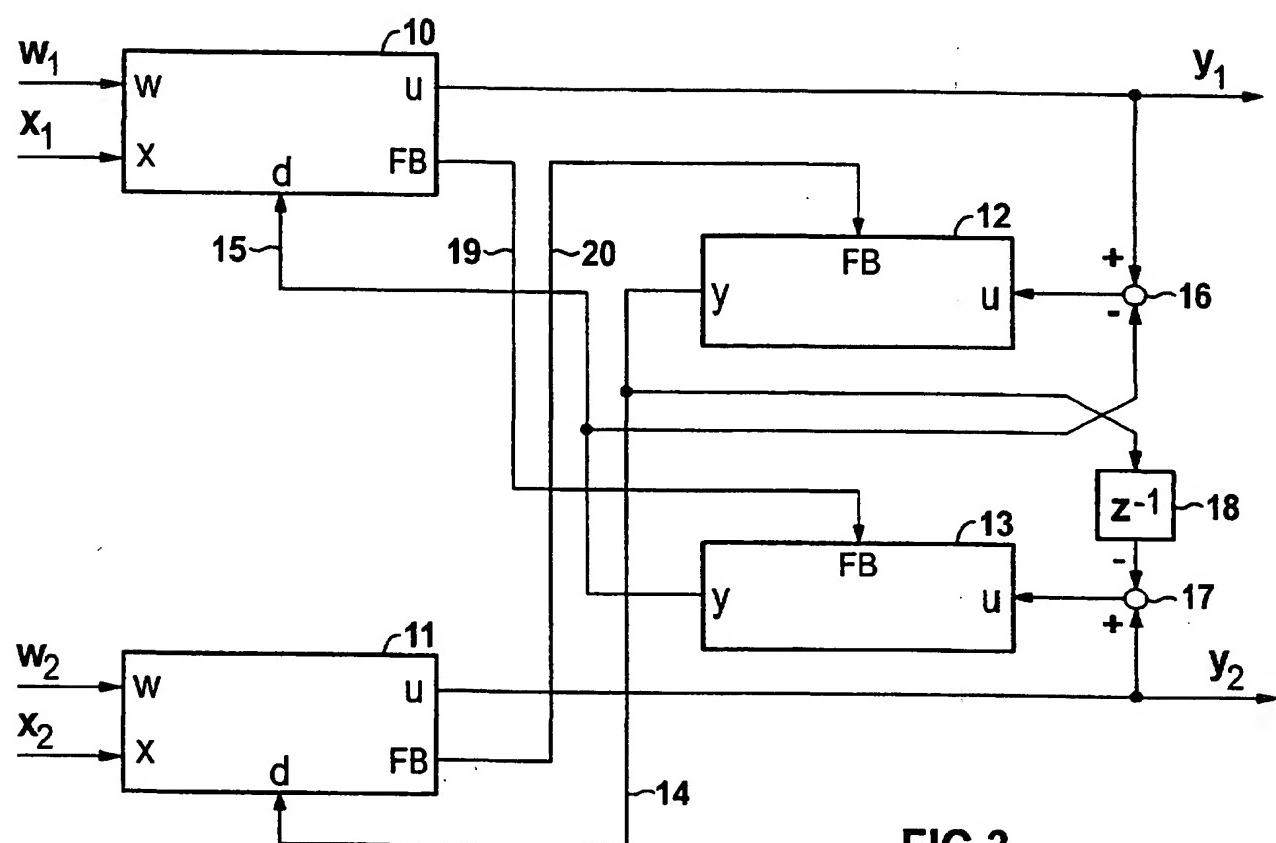


FIG 3

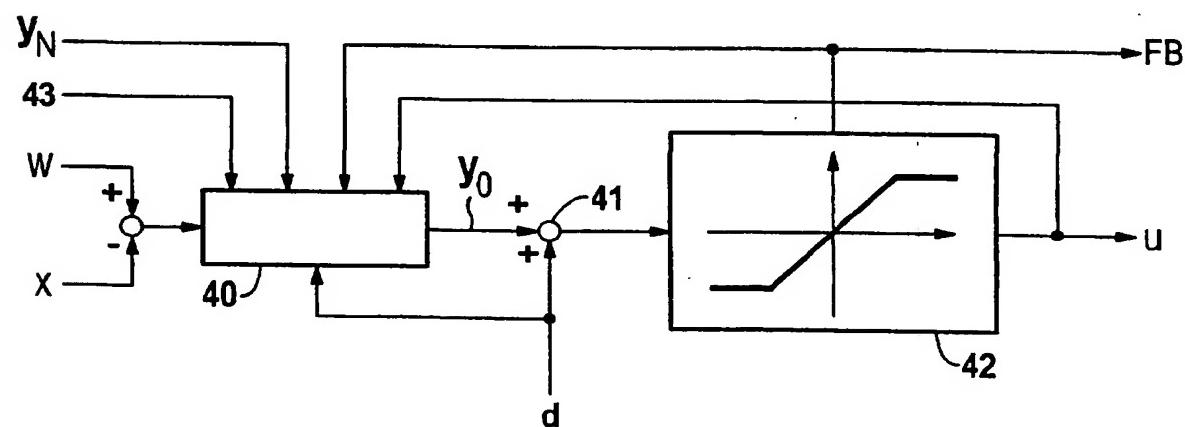


FIG 4

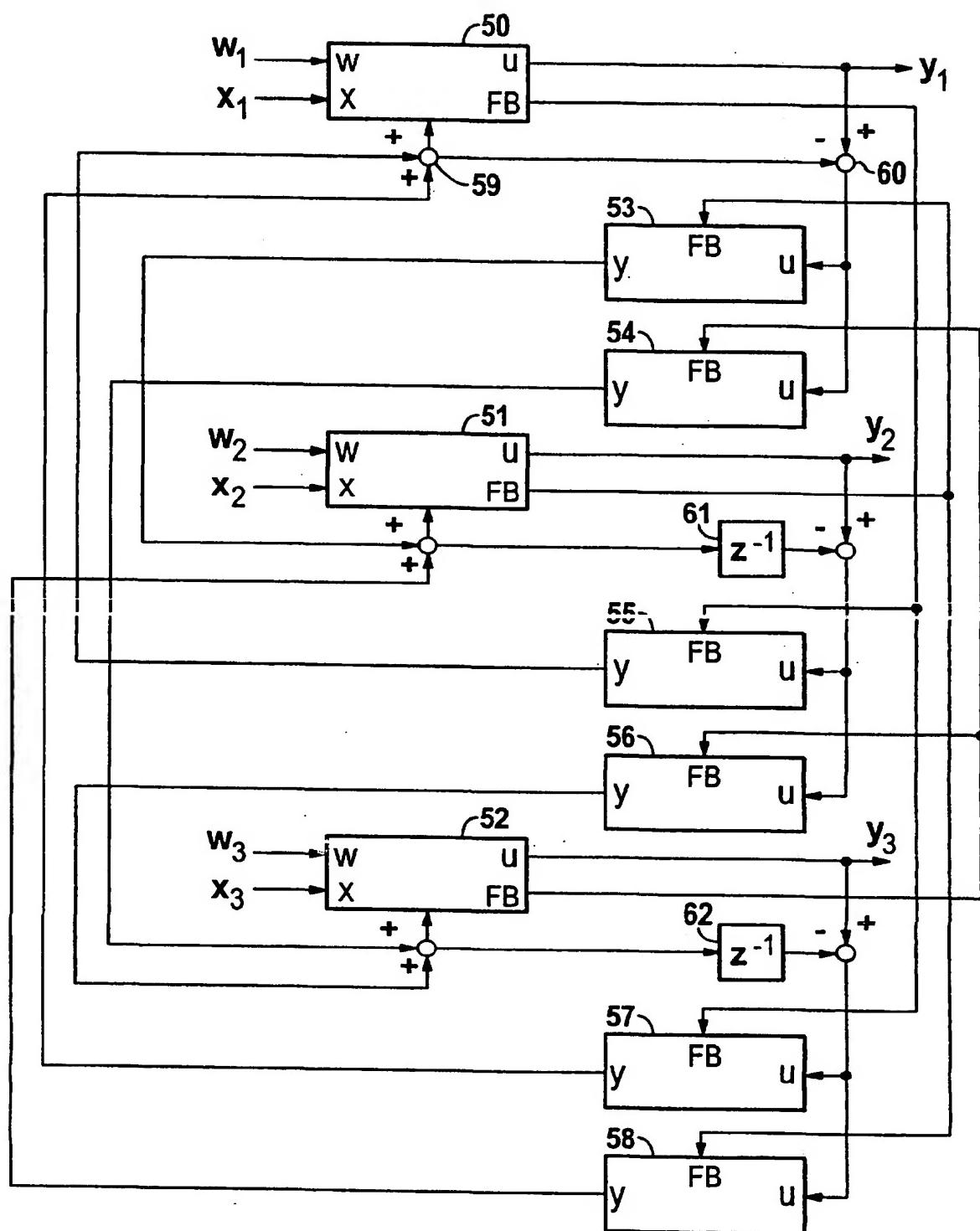


FIG 5